МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 697.1 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267

Тепловой расчет конструкций



А. В. Майстренко  
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
✉ anatol-maystrenko@yandex.ru

Введение. Рассмотрен тепловой расчет объемной конструкции с использованием метода конечных элементов. По планам Министерства энергетики РФ в стране в ближайшие годы будет создана мощная индустрия ветровой энергетики. В связи с этим расчеты при производстве строительных конструкций ветроэнергетических установок в настоящее время приобретают большое значение. Производство таких конструкций из стеклопластика представляет собой сложный термохимический процесс, включающий полимеризацию связующего при строго заданных тепловых режимах. Целью работы является разработка методики трехмерного конечно-элементного расчета нестационарного режима нагрева составной конструкции сложной формы.

Материалы и методы. Определение полей температур конструкции сложной формы, выполненной из неоднородных материалов, приводит к необходимости применения численных методов и, в первую очередь, метода конечных элементов. Конечно-элементное моделирование поведения композиционных материалов при формовании до настоящего времени остается незавершенным. Для частичного ее решения выполнена адаптация известного уравнения теплопроводности для конкретной задачи на основе первого закона термодинамики. Предложены новые конечно-элементные модели, описывающие тепловые поля в конструкции при ее изготовлении. Определена точность моделирования тепловых процессов. Проведено численное моделирование нагрева.

Результаты исследования. Решение задачи выполнено в многофункциональном программном комплексе ANSYS с реализацией методики расчета на языке параметрического программирования APDL. Рассчитаны поля температуры лопастных элементов ветроэнергетических установок на этапе их изготовления, что позволило выявить характерные особенности технологического процесса производства данных конструкций и получить рекомендации по уточнению процесса их склейки.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в тепловых расчетах элементов строительных слоистых конструкций сложной формы из композиционных материалов в ветроэнергетике, машиностроении, авиастроении, судостроении, приборостроении и т. д.

Ключевые слова: конечно-элементный расчет, температурное поле, неметаллическая конструкция, технологический процесс, моделирование.

Для цитирования: Майстренко, А. В. Тепловой расчет конструкций / А. В. Майстренко // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 3. — С. 260–267. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267



Building structures thermal calculation

A. V. Maistrenko  ✉
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
✉ anatol-maystrenko@yandex.ru

Introduction. The thermal calculation of a volumetric structure using the finite element method is considered. According to the plans of the Ministry of Energy of the Russian Federation, a powerful wind energy industry will be created in

the country in the coming years. In this regard, calculations in the production of building structures of wind power plants are currently becoming a challenge. The production of such fiberglass structures is a complex thermochemical process, including the polymerization of the binder under strictly specified thermal conditions. The work objective is to develop a method for three-dimensional finite element calculation of the non-stationary heating mode of a complex-shaped composite structure.

Materials and Methods. The determination of the temperature fields of a complex-shaped structure made of inhomogeneous materials causes using numerical methods and, first of all, the finite element method. The finite element modeling of the behavior of composite materials under molding is still incomplete. For its partial solution, the well-known heat conduction equation is adapted for a specific problem based on the first law of thermodynamics. New finite element models describing the thermal fields in the structure during its manufacture are proposed. The accuracy of modeling thermal processes is specified. Numerical simulation of heating is carried out.

Results. The solution to the problem was performed in the multifunctional software complex ANSYS with the implementation of the calculation method in the parametric programming language APDL. The temperature fields of the blade elements of wind power plants at the stage of their manufacture were calculated, which made it possible to identify the characteristic features of the production process of these structures and to obtain recommendations for clarifying the process of their gluing.

Discussion and Conclusions. The results obtained can be used in thermal calculations of elements of complex layered structures made of composite materials in wind power, mechanical engineering, aircraft, shipbuilding, instrumentation, etc.

Keywords: finite element calculation, temperature field, nonmetallic structure, technological process, modeling.

For citation: A. V. Maistrenko. Building structures thermal calculation. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 3, p. 260–267. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267

Введение. Тепловые расчеты при производстве строительных конструкций ветроэнергетических установок в настоящее время приобретают большое значение. По планам Министерства энергетики РФ[1] в стране в ближайшие годы будет создана индустрия ветровой энергетики. В 2016–2017 гг. в нее пришли крупные российские и иностранные инвесторы, которые взяли обязательства по развитию технологической и производственной базы. Устраняются основные недостатки лопастных ветроэнергетических установок путём совершенствования их конструкции и технологии изготовления. В первую очередь это относится к лопастям, которые являются основными элементами ветротурбины, концентрирующими главную интеллектуальную составляющую установки. Производство стеклопластиковой лопасти представляет собой сложный термохимический процесс, включающий полимеризацию связующего при строго заданном тепловом режиме. В связи с этим точный расчет температурных полей в теле лопасти при ее формовании имеет большое практическое значение.

Определение полей температур конструкции сложной формы, выполненной из неоднородных материалов, приводит к необходимости применения в расчетах численных методов и, в первую очередь, метода конечных элементов (МКЭ). Проблема конечно-элементного моделирования композиционных материалов при формовании остается до настоящего времени нерешенной. Это определяется сложностью поведения композита как неоднородного материала, обладающего ярко выраженными термозависимыми физическими, в т. ч. реологическими свойствами, остаточными внутренними явлениями, старением и др.

Современные модели учитывают анизотропность материала, его пластическое поведение при сложном напряженно-деформированном состоянии и др. Так, в работах [1, 2] исследованы температурные свойства композиционных материалов. Для обоснования и подтверждения влияния распределения и ориентации упрочняющих частиц на коэффициент температурного расширения материала авторами выполнено конечно-элементное моделирование. При геометрическом построении за основу была принята реальная микроструктура. Расчетами установлено, что экспериментально обнаруженная анизотропия температурных свойств объясняется внутренними напряжениями в композите, зависящими от ориентации наполнителя.

Многие исследования посвящены расчетам двумерных моделей армированных композиционных материалов. Для анализа и оптимизации свойств композита предложена расчётная конечно-элементная схема, учитывающая его температурные свойства [3]. С помощью МКЭ рассчитаны поля остаточных напряжений, образующихся в матрице в результате термической обработки для модели композита, включающего армирующие волокна [4]. С использованием конечно-элементной модели рассчитаны эффективные упругие характеристики многослойного композиционного материала, причем каждый слой описывался собственными термомеханиче-

[1]Возобновляемая энергетика в России состоялась как отрасль / Министерство энергетики российской федерации // minenergo.gov.ru : [сайт]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/10307/ (дата обращения: 04.02.2021).

скими свойствами [5]. Моделирование поведения анизотропных материалов и другие вопросы термонагружения проанализированы также в работах [6–13].

Большинство исследований, базирующихся на конечно-элементном анализе, выполнены с использованием универсальной программной системы ANSYS, позволяющей решать линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные пространственные задачи теплопередачи и теплообмена. Например, с помощью ANSYS решены задачи:

- нестационарного нагрева конструкции при наличии зависимости от времени коэффициента конвекции[2];
- теплового расширения элементов при интенсивном нагреве[3];
- тепловыделения при пластической деформации[4];
- передачи теплоты в многослойных конструкциях через границу раздела сред[5] и др.

Исследованию процессов обработки полимерных композиционных материалов посвящены работы С. Н. Шевцова, например [14]. Несмотря на большое количество работ, посвященных численным тепловым расчетам, актуальность оценки теплового режима формования конструкций лопастных установок сохраняется. Повышение требований к качеству производства элементов ветротурбин приводит к необходимости дальнейшего уточнения математических конечно-элементных моделей теплопередачи на основе более полного учета внешних и внутренних факторов.

Целью работы является исследование нестационарных полей температур составной конструкции сложной объемной формы лопастного элемента ветроэнергетической установки в процессе ее изготовления при учете физических особенностей и геометрических нелинейностей. Одна из конструкций состоит из лонжерона и хвостового отсека, части которых выполнены из стеклопластика, резины, вспененного пластика и др. Хвостовой отсек изготавливается по клеевой технологии в специальном приспособлении, которое состоит из верхнего и нижнего полукорпусов с мощными ребрами жесткости. Между ними закладывается лопастной элемент. Для его качественной склейки необходимо строго выдерживать скорость нагрева и температуру выдержки в клеевых швах. Задание теплового режима осуществляется размещением приспособления с отсеком в нагревательной печи.

Постановка задач работы состоит в следующем. Требуется создать конечно-элементную модель нагрева лопастного элемента при его формовании, рассчитать объемные поля температуры в любой момент процесса, определить точность моделирования тепловых процессов в теле конструкции, а также сформировать график набора температуры в печи, обеспечивающий требуемый режим нагрева клеевых зон отсека.

Материалы и методы. Основой тепловых расчетов является утверждение первого закона термодинамики о том, что количество теплоты, полученное изолированной системой, затрачивается на изменение ее внутренней энергии. Применительно к элементарному объему это утверждение можно выразить математически:

$$\rho c(\partial T/\partial t+\{V\}^T\{L\}T)+\{L\}^T\{q\}=q_v, \tag{1}$$

где ρ — плотность материала; c — удельная теплоемкость; T — температура; t — время; $\{q\}$ — вектор теплового потока; q_v — тепловыделение единичного объема.

Векторный оператор $\{L\}$ и вектор скорости $\{V\}$ для теплопередачи, реализуемой массой:

$$\{L\}=\begin{Bmatrix}\dfrac{\partial}{\partial x}\\ \dfrac{\partial}{\partial y}\\ \dfrac{\partial}{\partial z}\end{Bmatrix},\quad \{V\}=\begin{Bmatrix}V_x\\ V_y\\ V_z\end{Bmatrix},$$

где x, y, z — координаты.

По закону Фурье тепловой поток связан с градиентом температуры:

$$\{q\}=-[D]\{L\}T, \tag{2}$$

где $[D]$ — матрица теплопроводности:

[2] Thermal Time-Transient Loading and Solution in Ansys / SimuTechGroup // simutechgroup.com : [сайт]. — URL: https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/97-fea-tips-tricks-thermal-transient. (дата обращения: 04.02.2021).

[3] Extreme Thermal Expansion Modeling in Ansys Mechanical Workbench / SimuTechGroup // simutechgroup.com : [сайт]. — URL: https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/139-extreme-thermal-expansion-modeling-in-ansys-mechanical. (дата обращения: 04.02.2021).

[4] Heat Generation in Plastic Deformation Using Ansys Mechanical APDL and Workbench V14.5: Application of the New Act Module / SimuTechGroup // simutechgroup.com : [сайт]. — URL: https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/171-fea-tips-tricks-ansys-heat-generation-plastic-deformation. (дата обращения: 04.02.2021).

[5] Heat Conduction Across a Contact Element Gap in Ansys Workbench Mechanical / SimuTechGroup // simutechgroup.com : [сайт]. — URL: https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/229-fea-tips-tricks-heat-conduction-contact-element-gap-ansys-workbench-mechanical. (дата обращения: 04.02.2021).

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix}.$$

Объединяя (1) и (2), получим:

$$c(\partial T / \partial t + \{V\}^T \{L\} T) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + q_v. \quad (3)$$

Раскрывая (3), получим:

$$\rho c(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z}) = q_v + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right).$$

Основное уравнение теплопроводности дополняется граничными условиями:

1. Задание температуры на поверхности: $T = T^*$.
2. Задание теплового потока на поверхности:

$$\{q\}^T \{n\} = -q^*,$$

где $\{n\}$ — нормальный к поверхности единичный вектор; q^* — удельный тепловой поток.

3. Теплопередача соответствует закону Ньютона (поверхностная конвекция):

$$\{q\}^T \{n\} = \alpha_f (T_s - T_b),$$

где α_f — коэффициент теплопередачи, T_s — температура на поверхности, T_b — температура граничащей среды.

Для случая постоянных теплофизических коэффициентов исследуемые тепловые процессы описываются трехмерным уравнением нестационарной теплопроводности (уравнением Фурье):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где λ — коэффициент теплопроводности.

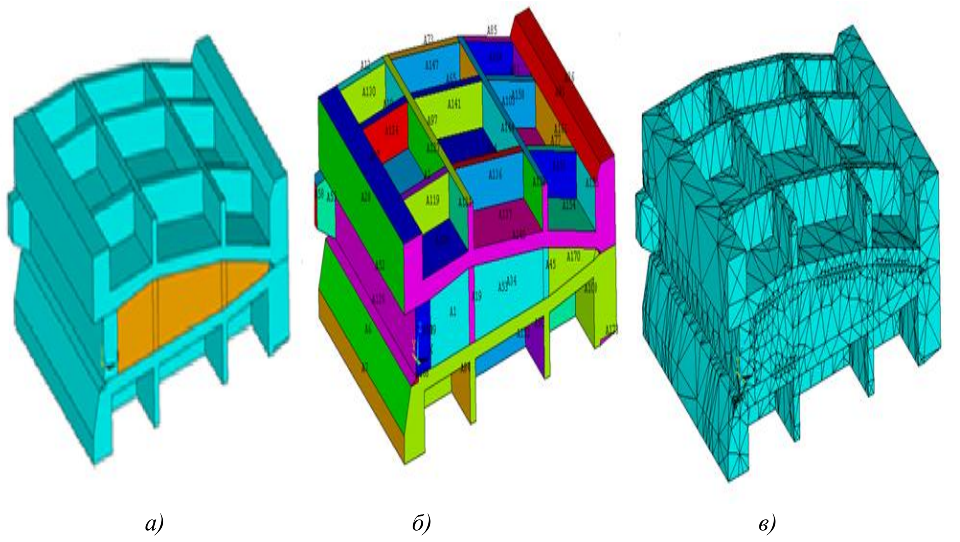
В связи с симметричностью задачи расчет проводится лишь для половины конструкции. Граничные условия для плоскости сечения определяются из условия: $q = 0$.

На стыковочных поверхностях предполагается идеальный тепловой контакт, отсутствие термического сопротивления:

$$T\big|_{-0} = T\big|_{+0}\ ;\ \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{+0}.$$

Конвективные тепловые потоки подводятся к наружным поверхностям приспособления. Внутреннее тепловыделение при нагреве не учитывается. Начальные условия предполагают фиксацию постоянной температуры по всей исследуемой области: $T = T_0$.

Задача решена методом конечных элементов в многофункциональном программном комплексе ANSYS на языке параметрического программирования APDL. Конструкция нагревается с наружной поверхности конвекцией. Результаты разбивки приспособления и отсека на блоки, а также на объемные тетрагональные конечные элементы представлены на рис. 1.



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Склеечное приспособление с хвостовым отсеком: *а* — общий вид; *б* — поверхности модели с указанием их номеров; *в* — разбивка анализируемой области на конечные элементы

Теплофизические свойства материалов, используемых в расчетах, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов

Материал	λ, Вт/(м·К)	*c*, Дж/(кг·К)	ρ, кг/м^3
Стеклопластик	0,38	1230	1710
Al-сплав	176	798	2700

Созданная для решения поставленной задачи программа определяет значения температуры в каждом расчетном узле на протяжении всего технологического процесса склейки.

Алгоритм расчета состоит из следующих шагов:

- задание исходных данных (геометрии, теплофизических свойств, начальной температуры и т. п.);
- разбивка области на конечные элементы;
- приложение тепловых источников;
- определение температуры области в конце шагов нагрева;
- вывод результатов расчета (тепловых потоков, температурных полей) на печать.

Для проверки правильности работы программа проходила тестирование. На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени в клеевой зоне (нижние кривые) и в самой печи (верхние кривые). Абсолютная погрешность расчета температуры в точке склейки не превышает 5 ^{o}C, относительная погрешность для реально значимых температур — не более 6 %.

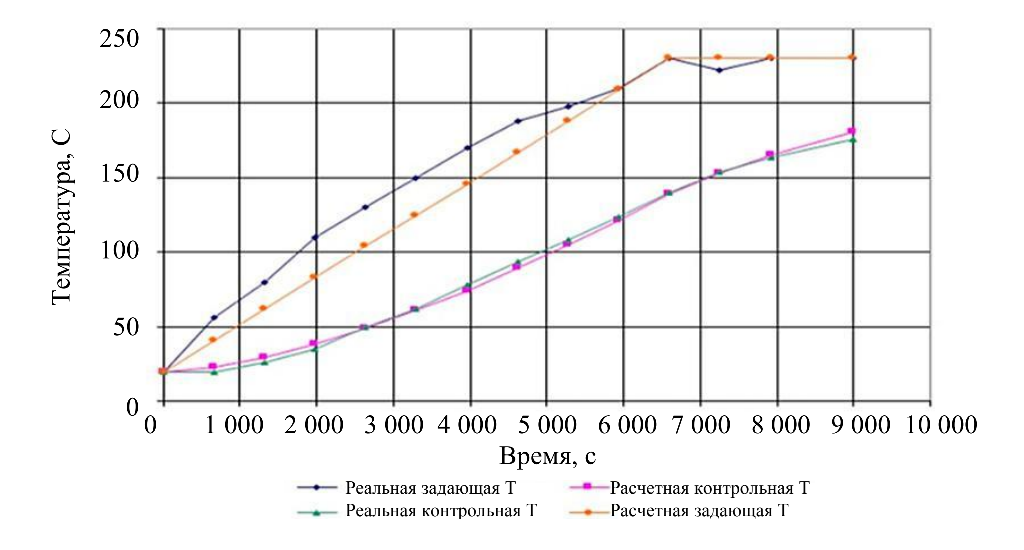
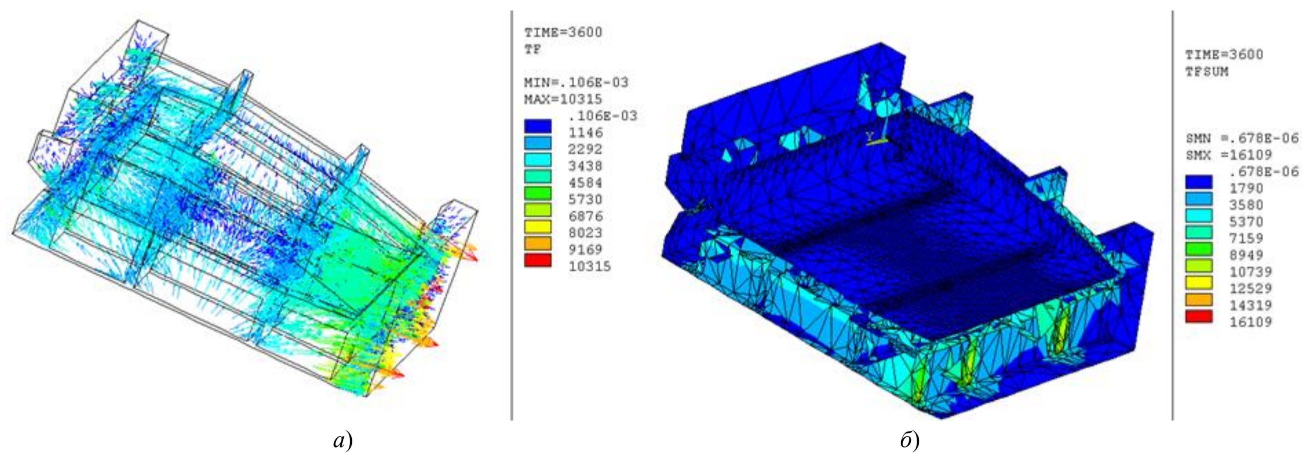


Рис. 2. Зависимости от времени расчетных и измеренных температур в контрольной и задающей точках

Результаты исследования. Технологический процесс включает в себя монотонный, непрерывный нагрев склеечного приспособления и лопастного элемента до определенной температуры и ее поддержание заданное время. Результаты расчета приведены на рис. 3–7. Так, на рис. 3 представлено распределение по объему в определенный момент времени тепловых потоков в векторной форме и суммарное количество теплоты в теле приспособления с отсеком.



а) *б*)

Рис. 3. Тепловые потоки (*а*) и суммарный нагрев (*б*) приспособления с отсеком

Так как скорость нагрева приспособления относительно невелика, тепловые потоки перераспределяются по его объему равномерно и оказываются приблизительно одинаковыми по всем направлениям. Небольшие исключения касаются лишь ребер жесткости. Конвективные тепловые потоки подводятся с боков, имеющих большую площадь, а отводятся теплопроводностью в тело полукорпусов через узкое поперечное сечение.

На рис. 4 представлены температурные градиенты в теле приспособления с отсеком в один из моментов нагрева. Видно, что тепло распространяется от наружных поверхностей приспособления к внутренним областям. Тепловые потоки наиболее активно подводятся в местах близких к боковому вкладышу и перемещаются одновременно как от бокового вкладыша, так и от верхнего и нижнего полукорпусов приспособления. На этом же рисунке представлен объемный вид температурного поля в аналогичный момент времени. Поскольку лопастной отсек неметаллический, его теплопроводность низка, и распределение температуры оказывается неравномерным.

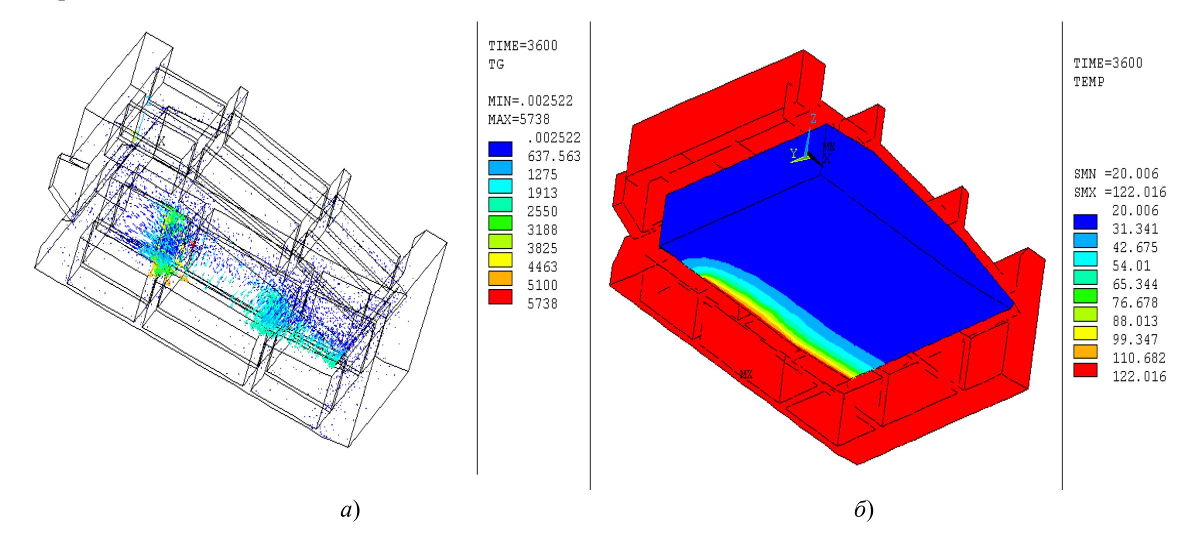


Рис. 4. Векторные поля градиента температуры (*а*) и температуры (*б*) в теле приспособления с лопастным отсеком

Зависимости температуры от времени в отдельных точках клеевой зоны представлены на рис. 5–7. Изменением значений задающих температур окружающей среды и количества их переключений можно добиться максимального соответствия графика набора и выдержки температуры в клеевых зонах требованиям технологического процесса.

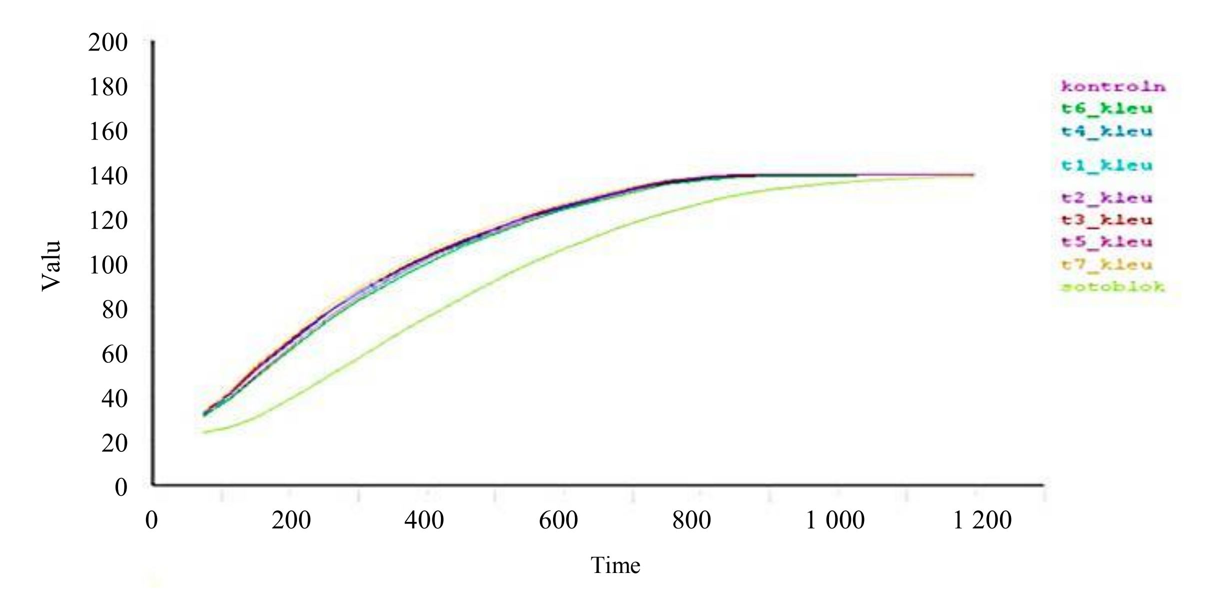


Рис. 5. Зависимости температуры от времени в характерных точках клеевых зон и в блоке (зеленая линия) для технологического режима, включающего два переключения при задающих температурах 160 и 140 °С

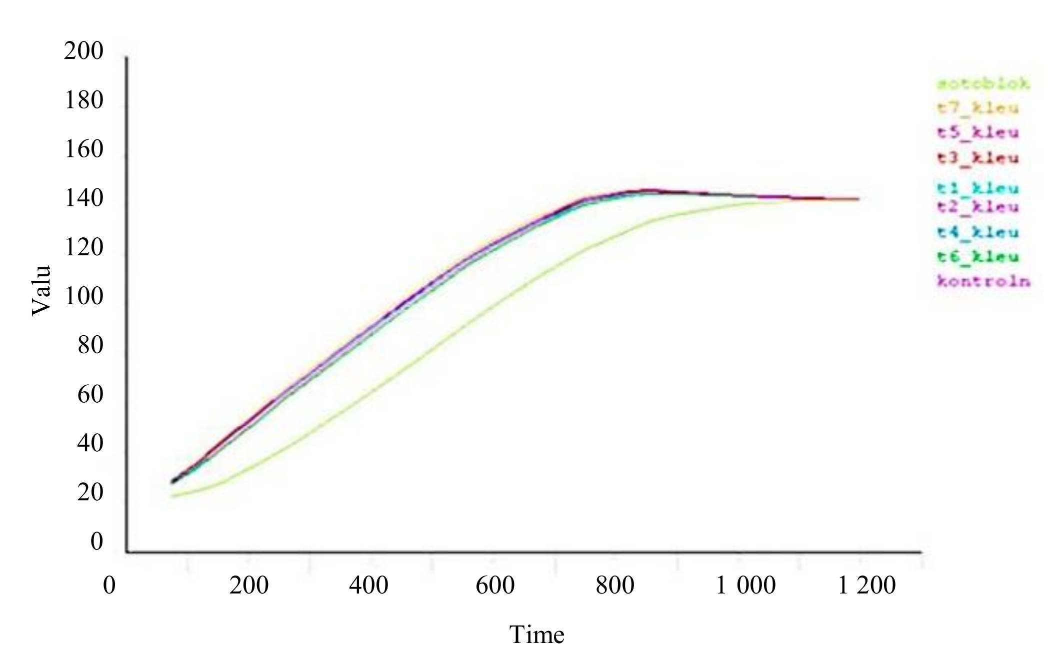


Рис. 6. Зависимости температуры от времени в характерных точках клеевых зон и в блоке (зеленая линия) для технологического режима, включающего четыре переключения при точности задания температуры до 10 °С

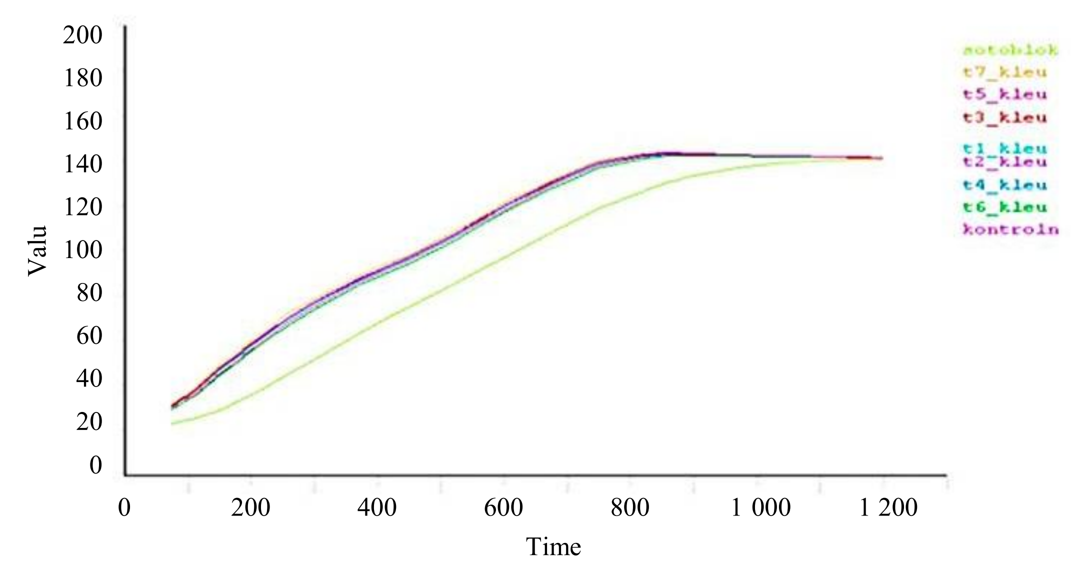


Рис. 7. Зависимости температуры от времени в характерных точках клеевых зон и в блоке (зеленая линия) для технологического режима, включающего три переключения

Обсуждение и заключения. Выполненный тепловой расчет элементов строительных конструкций ветроэнергетических установок на этапе изготовления позволил выявить характерные особенности нагрева и получить рекомендации по уточнению параметров технологического процесса их склейки.

Библиографический список

1. Chawla, N. Thermal expansion anisotropy in extruded SiC particle reinforced 2080 aluminum alloy matrix composites / N. Chawla, X. Deng, D.R.M. Schnell // Material Science and Engineering A. — 2006. — Vol. 426 (1). — P. 314–322. 10.1016/j.msea.2006.04.054

2. Chawla, K. K. Thermal Shock Behavior of Ceramic Matrix Composites / K. K. Chawla, N. Chawla / Encyclopedia of Thermal Stresses. — John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. — 2014. — P. 370–374. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_94

3. Boguszewski, T. Design rules for optimizing microstructures of composite for thermal management / T. Boguszewski, L. Ciupinski, K. Kurzydlowski // In: Proc. Int. Conf. on Advanced Processing for Novel Functional Materials. — APNFM 2008. — 2012. URL: https://moam.info/1-design-rules-for-optimising-microstructures-of-composite-for-thermal-_5b2bfd3e097c47717f8b459d.html (accessed: 29.04.2019).

4. Maligno, A. Finite element investigations on the microstructure of fibre-reinforced composites / A. Maligno, N. A. Warrior // eXPRESS Polymer Letters. — 2008. — Vol. 2 (9). — P. 665–676. 10.3144/expresspolymlett.2008.79

5. Xu, Y. J. Microstructure modeling and prediction of effective elastic properties of 3D multiphase and multi-layer braided composite / Y. J. Xu, W. H. Zhang, M. Domaszewski // Materials Science and Technology. — 2011. — Vol. 27 (7). — P. 1213–1221.

6. Modeling Anisotropic Multiphase Heterogeneous Materials via Directional Correlation Functions: Simulations and Experimental Verification / Sudhanshu S. Singh, Yang Jiao, Jason J. Williams, Nikhilesh Chawla // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2012. — Vol. 43 (12). — P. 4470–4474. 10.1007/s11661-012-1451-7

7. Yazzie, K. E. The Asymmetric Growth Behavior of Intermetallic Compound Layers During Extended Reflow of Sn-rich Alloy on Cu / Kyle E. Yazzie, Jonathan Topliff, Nikhilesh Chawla // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2012. — Vol. 43. — P. 3442–3446.

8. Three-dimensional (3D) Microstructure-Based Modeling of Interfacial Decohesion in Particle Reinforced Metal Matrix Composites / J. J. Williams, J. Segurado, J. LLorca, N. Chawla // Materials Science and Engineering: A. — 2012. — Vol. 557. — P. 113–118. 10.1016/j.msea.2012.05.108

9. Cyclic Indentation Behavior of Metal-Ceramic Nanolayered Composites / Y.-L. Shen, C. B. Blada, J. J. Williams, N. Chawla // Materials Science and Engineering: A. — 2012. — Vol. 557. — P. 119–125. 10.1016/j.msea.2012.05.103

10. Finite Element Simulation of Swelling-Induced Crack Healing in Gels / J. Zhang, Y. An, K. E. Yazzie [et al.] // Soft Matter. — 2012. — Iss. 31. — P. 8107–8112.

11. High Temperature Nanoindentation Behavior of Al/SiC Multilayers / S. Lotfian, J. M. Molina-Aldareguia, K. E. Yazzie [et al.] // Philosophical Magazine Letters. — 2012. — Vol. 92 (8). — P. 362–367. 10.1080/09500839.2012.674220

12. Environmental Effects on Fatigue Crack Growth in 7075 Aluminum Alloy / A. Bonakdar, F. Wang, J. J. Williams, N. Chawla // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2012. — Vol. 43 (8). — P. 2799–2809. 10.1007/s11661-011-0810-0

13. Walters, J. L. Influence of Thermal Aging on the Microstructure and Mechanical Behavior of Sintered Dual Phase Stainless Steels / J. L. Walters, J. J. Williams, N. Chawla // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2012. — Vol. 43. — P. 124–135.

14. Шевцов, С. Н. Повышение производительности обработки и качества отверстий в слоистом армированном титаном стеклопластике за счет снижения виброактивности процесса сверления / С. Н. Шевцов, В. В. Сибирский, Е. Г. Чигринец // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — Т. 16, № 1. — С. 119–126. https://doi.org/10.12737/18273

Поступила в редакцию 05.07.2021
Поступила после рецензирования 26.07.2021
Принята к публикации 27.07.2021

Об авторе:

Майстренко Анатолий Викторович, доцент кафедры «Информационные системы в строительстве», ФГБУ ВО «Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, Scopus ID: 57204525180, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8391-7169, anatol-maystrenko@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.